

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02339

研究課題名（和文）シリコン中のドーパント原子を用いた単一フォノン制御

研究課題名（英文）Single phonon control by dopant atoms in silicon

研究代表者

小野 行徳（ONO, YUKINORI）

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号：80374073

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,100,000円

研究成果の概要（和文）：ナノスケールシリコンにおける「熱」（フォノンの拡散）の制御に向け、基礎学理を探究しその基本技術を発展させた。具体的には、電子流体効果をシリコンにおいてはじめて観測し、フォノンによるエネルギー散逸を避けて電流増幅が可能であることを示した。また、電子正孔再結合過程のエネルギー散逸過程におけるドーパントの役割を明らかにするとともに、ナノスケールトンネルデバイスにおけるフォノン放出とドーパントクラスターとの関係性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題は、集積回路のエネルギー消費の限界を打破するために、ナノスケールのシリコンデバイスのエネルギー消費の本質に立ちかえり、従来とは原理の異なる低消費電力デバイスの創造を探索するものである。ここで得られた結果は、ナノスケールにおける電子のエネルギー消費機構解明に貢献するとともに、このような新規デバイス設計の道標を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：We investigated the basic physics of energy dissipation and develop some elemental techniques towards precise control of phonon in nanoscale silicon. We for the first time observed the electron-hydrodynamic effects in silicon, and demonstrated that the phonon emission is possible to prevent, resulting in the current amplification with an extremely small energy dissipation. In addition, we clarified the role of dopants during in the electron-hole recombination process. We also clarified relationship between the phonon emission and the dopant clusters in nano-scaled tunnel diodes.

研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：ドーパント フォノン シリコン エネルギー散逸

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、半導体中のドーパント原子を利用した新デバイスコンセプトが次々と打ち出されており、単一ドーパント・テクノロジーと呼ばれる新分野が形成されつつある。半導体中のドーパント原子は、単一電荷の捕獲が可能であり、このため量子ドットとして機能する。その特性はドーパント種により一意に決まり、個々のドーパント種に特有の電氣的、磁氣的、光學的性質を利用した様々な応用が期待されている。その一例が、リン原子の持つ核スピン自由度であり、量子情報処理分野で活発な研究が行われている。

このような(人工量子ドットにはない)ドーパント量子ドット特有の自由度に格子(原子)振動がある。本研究ではこの未踏の自由度に着目する。例えば、ボロンのような軽元素ドーパントは、局在フォノン(局在振動)モードを有しており、この局在フォノンは正孔による励起が可能である。また、砒素やビスマスなどのイオン化エネルギーの大きいドナーでは、その内殻遷移が特定のバレー間(intervalley)フォノンと非常に強く結合するが、この事実は、ドーパント原子から単一フォノン放射が可能であることを意味している。

このようなドーパント原子の特徴から、原子と格子系との強結合が、フォノンの生成、消滅の制御可能なチャネルになり得るのではないかと期待される。すなわち、ドーパント原子への単一電荷の捕獲放出の電氣的制御を通して、電子系⇄格子系エネルギー変換を単一フォノンのレベルで制御することが可能になるのではないかと期待される。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、シリコンをベースとして、上述のドーパント原子と格子系との強結合を利用することにより、フォノンの生成、伝送(転送)、消滅の電氣的(ゲート)制御を実証することにある。またこれにより、革新的な低消費電力情報処理技術創生に向けた新たな道標を示すことにある。

近年、「熱」(すなわちフォノンの拡散)や機械振動(すなわちフォノンの集団励起)の制御を目指す、いわゆる「Phononics」が急速に発展しており、ナノメカトロニクス技術を利用した機械振動の生成や伝搬の電氣的制御も報告されてきている。本課題は、このような「フォノン制御工学」創生の一大潮流の中で、フォノンそのものの制御ではなく、フォノンと電子系とのエネルギー授受(格子系⇄電子系エネルギー変換)に焦点を当てるものである。

本課題により、シリコンを基盤として、電子系⇄格子系エネルギー変換を単一フォノンのレベルで制御するための基本要素技術が確立される。これにより、電荷に加えフォノンを情報の担い手とした新規情報処理技術創出のための新たな道を切り開くことができる。すなわち、極めてエネルギー効率の高い革新デバイス創出に向けた新たな工学領域を創生できるものと期待される。

### 3. 研究の方法

本研究では、研究代表者が培ってきた以下の技術が重要となる。第一に、ドーパント原子を量子ドットとする単一原子トランジスタの作製技術である。研究代表者らは世界に先駆けてトランジスタ中の単一ボロンアクセプターを検出するとともに、2個のボロン原子から成る結合量子ドットの形成に成功している。これらは、ドーパント原子におけるフォノンの励起、およびフォノンの近傍原子への転送を実現するために必須の技術となる。第二に、ドーパント電荷の操作技術である。研究代表者らは、砒素原子を用いて電子の捕獲、放出を単一原子のレベルで操作でき、同時にイオン化エネルギーやエネルギー準位の電界制御を行うことができることを実証している。これにより、ドナー原子からの単一フォノン放射(単一フォノン送信)のゲート制御が可能になると期待できる。第三に、高感度単一電荷検出技術である。これにより、ドーパント原子のフォノン吸収に伴う単一電子放出を検出できる。すなわち、フォノンの検波が可能となる。

ここでは以上の技術的基盤のもとに、フォノンと電子の間のエネルギー授受の制御技術を検討する。

### 4. 研究成果

「本課題の第一の成果」は、ナノスケールシリコントランジスタにおける低温でのエネルギー散逸機構に関する新たな知見が得られたことである。具体的には、電子流体効果をシリコンにおいてはじめて観測し、フォノンによるエネルギー散逸を避けて電流増幅が可能であることを示した(Nature Communications, 2018: 文献[1])。この結果は、本来、電子の流れの中で熱(フォノンの拡散)として散逸するエネルギーを電子-電子散乱を用いて他の電子に移送することにより、電流増幅を実現するというものであり、電子-格子系エネルギー変換において、電子-電子散乱が本質的に重要な役割を担っていることを示しており、ドーパントからのフォノン放出、ドーパントを用いたフォノン吸収を観測するうえでも、重要な知見となる。

このためのデバイス構造を図1に示す。同デバイスは、silicon-on-insulator (SOI) 基板上に作製された。ここでは、電子-電子散乱の阻害要因となる不純物散乱を排除するため、ノンドープのSOI層(最終膜厚約20nm)を使用した。図1(a)に同デバイスの上面図と断面図を示す。また、図1(b)に電子顕微鏡写真を示す。デバイスはエミッター、コレクター、ベースとこれらを結ぶT字型シリコン細線から構成されており、エミッターとコレクターはそれぞれ独自の微細ゲートを有している。T字型シリコン細線の幅Wは約30nm、二つのゲート間の距離Lは約90nm

である。また、同デバイスは、シリコン細線と二つのゲート全体を覆う幅広のゲート（上層ゲート）を有しており、この上層ゲートに正の電圧を印加することにより、T字型細線、および微細ゲート近傍のエミッター、コレクター端子に電子反転層を誘起することができる。

図2は、エミッター電流  $I_E$  を  $-10\text{nA}$  に固定し、コレクター電流  $I_C$  をコレクターゲート電圧  $V_{CG}$  の関数として、温度  $8\text{K}$  で測定した結果を示している。ただし同図では、電流増幅率（コレクター電流とエミッター電流の比の絶対値）  $R_I = |I_C/I_E|$  をプロットしている（測定では、 $I_E$  は一定値に固定されているので、図の特性は  $I_C$  の特性に他ならない）。また、同測定では  $V_{EG}$  をパラメータにとっている。 $V_{CG}$  の閾値（ $V_{CG,TH} \approx 0\text{V}$ ）を超えると電流が流れ始めるが、 $|V_{EG}|$  が小さい（すなわち、 $|V_E|$  が小さい）ときには、 $R_I$  は  $0.5$  に近い値を示し、これは、エミッターから入射した電子が、コレクターとベースへほぼ等量流れ込んでいることを示している。しかし、 $|V_{EG}|$  を大きくしていくと  $R_I$  が増加し、 $1$  を超えるようになる。これは、ベース電流の向きが反転しベースからコレクターに電子が流れ込んでいることを示している。これらの電流の向きを図2の上部に示した。ここで観測された現象は、強い流れ（エミッターからの高エネルギー電子注入）により新たな流れ（ベースからコレクターへの電子流）が生成されるというものであり、汎用のアスピレーターにおける流体の流れに類似している。アスピレーターの動作原理は、後述するベルヌーイのポンプ効果に基づくものであり、その起源は流体を形成する粒子間の内部衝突（今の場合、電子-電子散乱）にある。

図2の挿入図は、縦軸を対数にとったものである。 $V_{CG,TH} (\approx 0\text{V})$  以下でホットエレクトロンに起因する電流が確認できるが、 $V_{CG,TH}$  以上の領域の電流に比べ3桁以上も小さい値となっており、これはT字型領域で強い電子-電子散乱が起こっていることを裏付けている。図1(c)に示すように、電子-電子散乱が起こると、T字型領域における低エネルギー電子がコレクター側へ弾き出され、結果として正電荷が蓄積される。この正電荷がT字型領域のポテンシャルを下げ、これにより、ベースからT字型領域へ電子が流れ込む。一方、コレクター側からの電子の逆流は、コレクターゲートが作る障壁（図1(c)における「hump」）によりブロックされる。このようにして、接地された二つの端子間に電流（ポンプ電流）が発生する。電子系における静電ポテンシャルは、一般の流体における圧力に対応しており、ここで観測された現象は、ベルヌーイのポンプ効果に対応している。

Si では電子に対する Umklapp 過程が存在しないため、電子-電子散乱において電子系のエネルギーと運動量は保存され、このため電子-電子散乱は電気抵抗に寄与しない。電気抵抗を支配するのは、フォノン散乱などの運動量非保存散乱である。したがって、MOS トランジスタのチャンネル中で起こっている電子-電子散乱の効果は明には表れず、電流駆動力を制限するのは、ソース端近傍で起こる運動量非保存散乱である。

ソース端近傍における運動量非保存散乱過程による反跳散乱 (back scattering) を免れた電子は、トランジスタの電流に寄与することになるが、チャンネル中で電界により得られるエネルギーと運動量は、そのまま熱となり散逸してしまう。この散逸過程はトランジスタでは避けることができない。一方、エレクトロン・アスピレーターでは、電流導入端子を新たに設けることで、本来熱として散逸してしまうエネルギーと運動量を、電子-電子散乱を通じて他の電子に移送し、これを電流増幅に繋げている。これにより、トランジスタの限界を超えてデバイスの駆動力を上げることが可能となる。一方、温度上昇に伴う  $R_I$  の低下は、フォノン散乱が原因であると結論された。フォノン散乱長は室温では、 $20\text{-}30\text{nm}$  程度であるので、室温動作に向けては、さらなるデバイスの微細化が必要となるが、上述のサイズであれば、現在の先端加工技術を用いることに

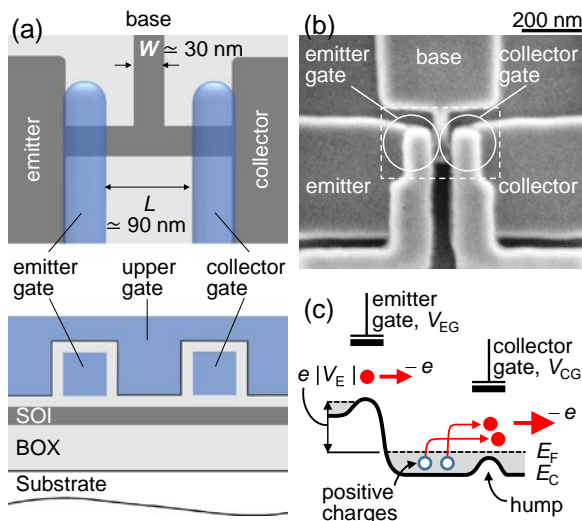


図1. (a)デバイスの上面図と断面図。(b)デバイスの電子顕微鏡写真。(c)T字型シリコン細線における電子-電子散乱の様子を表すポテンシャル図。

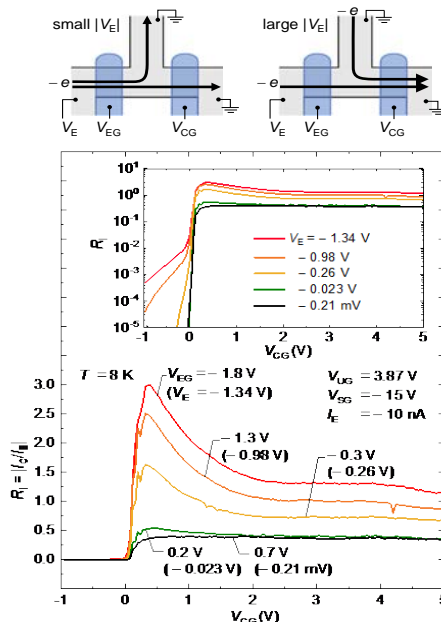


図2.  $R_I (=|I_C/I_E|)$  のコレクターゲート電圧  $V_{CG}$  依存性。挿入図は縦軸を対数表示したもの。図上部に  $|V_E|$  が小さい場合と大きい場合の、電子の流れる方向を示した。

より十分作製可能である。電子流体効果は、エネルギー散逸過程と密接に関わっている。したがって、消費電力低減が喫緊の課題であるナノスケールデバイスにおける電子流体効果研究は、フォノンの制御技術を確認するうえで新たな方向性を示すとともに、新規低消費電力デバイス創成に繋がるものと期待される。

「本課題の第二の成果」は、低温におけるエネルギー散逸を誘導する電子正孔再結合過程（チャージポンピング過程）においてドーパントが重要な役割を担っていることを明らかにしたことである（Phys. Rev. Appl., 2019, および投稿準備中 [2, 3]）。

ここでは、研究代表者らが開発したチャージポンピング EDMR(Electrically detected magnetic resonance)法を利用する。チャージポンピング EDMR 法は、チャージポンピング法に電子スピン共鳴 (ESR) 法を組み込んだ新規な手法である。チャージポンピング法では、トランジスタのゲートに高周波パルス電圧を印加する (図 3(a))。するとパルス電圧の立ち上がり時に欠陥に電子が捕獲され、続いて立ち下り時に捕獲電子が正孔と再結合する (図 3(b))。チャージポンピング法に ESR の手法を取り入れるためには、スピンの情報を電気信号 (電流) に変換する必要がある。ここでは、その最も有力な手段である、電子スピン共鳴 (ESR) の電気的読み出し手法である EDMR を適用した。(図 3(c))。EDMR のスピン偏極に関する感度は  $10^{-5}$  程度である。したがって、チャージポンピング電流のスピン偏極観測のためには、スピン共鳴条件下でごく微小な (フェムト( $10^{-15}$ )アンペアオーダーの) 電流変調を高い感度で検出する必要がある。本課題では、測定系のノイズの低減と、低温測定による信号強度の増大により、高感度 EDMR 測定のための技術を確認した。

図 4 は、同手法を用いて検出された信号の一例である。MOS トランジスタ界面欠陥である Pb 中心や  $E'$  中心の信号とともに、ヒ素(As)からの信号が明瞭に観測されている。このことは、再結合過程における電子捕獲とそのエネルギー散逸機構にドーパント原子が深く関与していることを示す結果である。

「本課題の第三の成果」は、ナノスケールのトンネル電流におけるフォノンとドーパントの相関を明らかにした点である (Appl. Phys. Letts. 2019, および Appl. Phys. Express 2019 [4, 5])。ナノスケールの pn 接合を SOI 基板上に作製 (図 5(a)) し、そのトンネル特性を低温にて観測した (図 5(b))。これにより、TA および TO フォノンに由来する明確な構造を観測することに成功した (図 5(c))。また同構造において、ドーパントの集合体 (ドーパントクラスター) が量子ドットとして機能することも明らかにした (図 5(d))。さらにこれらの特性を解析することにより、ナノスケールの pn トンネルデバイスにおけるフォノンとドーパントの役割について、その相関関係について議論した。

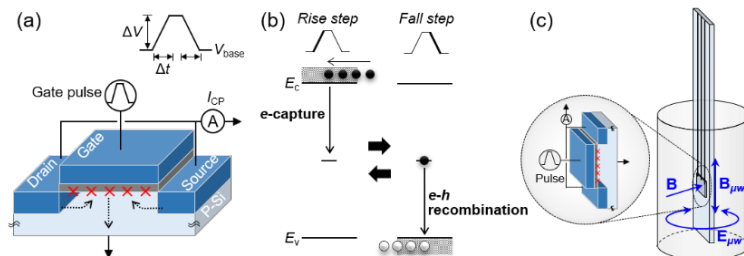


図 3(a)チャージポンピング測定のセットアップ。MOS トランジスタのゲートにパルス電圧を印加し、界面欠陥 (図中のバツ印) を介した電子正孔再結合電流  $I_{CP}$  から欠陥密度を評価する。(b)パルス 1 周期のチャージポンピング過程。反転状態で伝導帯 ( $E_c$ ) の電子が界面欠陥準位に捕獲され、蓄積状態で捕獲電子と価電子帯 ( $E_v$ ) の正孔が再結合する。(c)チャージポンピング EDMR 測定のセットアップ。シリコン MOS トランジスタを配線した状態で電子スピン共鳴装置に挿入し、チャージポンピング測定する。スピン共鳴に伴うチャージポンピング電流の微小変化 (EDMR 信号) を検出する。

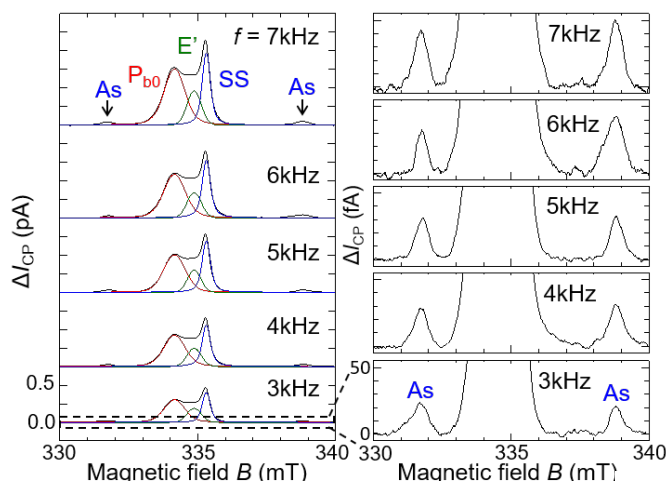


図 4. チャージポンピング EDMR 信号とヒ素(As)からの信号の拡大図。

「本課題の第三の成果」は、ナノスケールのトンネル電流におけるフォノンとドーパントの相関を明らかにした点である (Appl. Phys. Letts. 2019, および Appl. Phys. Express 2019 [4, 5])。ナノスケールの pn 接合を SOI 基板上に作製 (図 5(a)) し、そのトンネル特性を低温にて観測した (図 5(b))。これにより、TA および TO フォノンに由来する明確な構造を観測することに成功した (図 5(c))。また同構造において、ドーパントの集合体 (ドーパントクラスター) が量子ドットとして機能することも明らかにした (図 5(d))。さらにこれらの特性を解析することにより、ナノスケールの pn トンネルデバイスにおけるフォノンとドーパントの役割について、その相関関係について議論した。

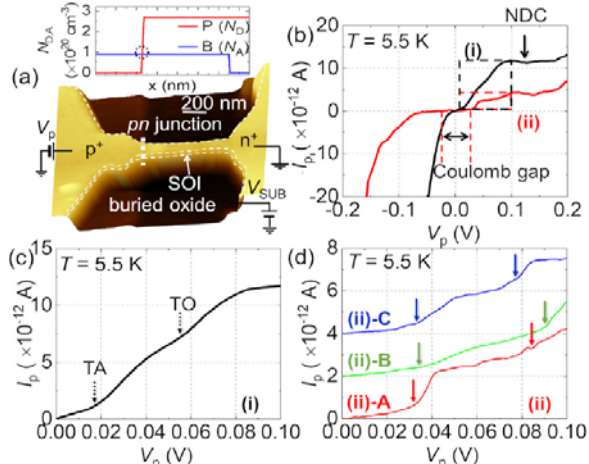


図 5. ナノスケールトンネルダイオードの AFM 像 (a) と電流電圧特性 (b)。フォノン放出に伴う電流電圧特性 (c) とドーパントクラスターに起因する電流電圧特性 (c), (d)。

参考文献 (代表的な研究成果)

- [1] H. Firdaus, et. al., Nat. Commun. Vol.9 (2018) pp.4813\_1-8.
- [2] M. Hori and Y. Ono, Phys. Rev. Appl. Vol. 11 (2019) pp.064064-\_1-12.
- [3] M. Hori and Y. Ono, in preparation.
- [4] G. Prabhudesai et. al., Appl. Phys. Lett. Vol.114 (2019) pp.243502\_1-5.
- [5] A. Afiff et. al., Appl. Phys. Express Vol.12 (2019) pp.085004\_1-5.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

|   |                          |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名<br>H. Firdaus, T. Watanabe, M. Hori, D. Moraru, Y. Takahashi, A. Fujiwara, Y. Ono                                      | 4. 巻<br>9                |
| 2. 論文標題<br>Electron Aspirator using Electron-electron Scattering in Nanoscale Silicon   | 5. 発行年<br>2018年          |
| 3. 雑誌名<br>Nature Communications   | 6. 最初と最後の頁<br>4813_1-8   |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1038/s41467-018-07278-8   | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>-                |
| 1. 著者名<br>H. Firdaus, T. Watanabe, M. Hori, D. Moraru, Y. Takahashi, A. Fujiwara, Y. Ono                                      | 4. 巻<br>113              |
| 2. 論文標題<br>Detection of single holes generated by impact ionization in silicon  | 5. 発行年<br>2018年          |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>163103_1-4 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1063/1.5046865  | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                |
| 1. 著者名<br>T. Tsuchiya, M. Hori, Y. Ono  | 4. 巻<br>-                |
| 2. 論文標題<br>Detection and Characterization of Single Near-Interface Oxide Traps with the Charge Pumping Method                 | 5. 発行年<br>2018年          |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of 2018 IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA) | 6. 最初と最後の頁<br>1-4        |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1109/IPFA.2018.8452495  | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                |
| 1. 著者名<br>M. Hori, T. Watanabe, Y. Ono  | 4. 巻<br>-                |
| 2. 論文標題<br>Real-time Monitoring of Charge-pumping Process for SiO <sub>2</sub> /Si Interface Analysis                         | 5. 発行年<br>2017年          |
| 3. 雑誌名<br>Intl. Symp. Elec. and Com. Eng  | 6. 最初と最後の頁<br>52-56      |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1109/QIR.2017.8168450   | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                |

|   |                          |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名<br>A.Samanta, M.Muruganathan, M.Hori, Y.Ono, H.Mizuta, M.Tabe, D.Moraru  | 4. 巻<br>110              |
| 2. 論文標題<br>Single-electron quantization at room temperature in a-few-donor quantum dot in silicon nano-transistors                                | 5. 発行年<br>2017年          |
| 3. 雑誌名<br>Appl.Phys.Lett.   | 6. 最初と最後の頁<br>093107_1-5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="http://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4977836">http://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4977836</a> | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                |

|  |                          |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名<br>M.Hori, T.Tsuchiya, Y.Ono  | 4. 巻<br>10               |
| 2. 論文標題<br>Improvement of charge-pumping electrically detected magnetic resonance and its application to silicon metal-oxide-semiconductor field-effect transistor | 5. 発行年<br>2017年          |
| 3. 雑誌名<br>Appl. Phys. Express  | 6. 最初と最後の頁<br>015701_1-4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.7567/APEX.10.015701">https://doi.org/10.7567/APEX.10.015701</a>  | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                |

|   |                          |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名<br>T.Watanabe, M.Hori, T.Tsuchiya, A.Fujiwara, Y.Ono   | 4. 巻<br>56               |
| 2. 論文標題<br>Time-domain charge pumping on silicon-on-indulator MOS devices   | 5. 発行年<br>2017年          |
| 3. 雑誌名<br>Jpn. J. Appl. Phys  | 6. 最初と最後の頁<br>011303_1-5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.7567/JJAP.56.011303">https://doi.org/10.7567/JJAP.56.011303</a> | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>M.Hori, Y.Ono   | 4. 巻<br>519         |
| 2. 論文標題<br>EDMR on recombination process in silicon MOSFETs at room temperature | 5. 発行年<br>2017年     |
| 3. 雑誌名<br>Springer Advances in intelligent system and computing                 | 6. 最初と最後の頁<br>89-93 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-           |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Y.Ono, M.Hori, G.P.Lansbergen, A.Fujiwara   | 4. 巻<br>519           |
| 2. 論文標題<br>Manipulation of single charges using dopant atoms in silicon-Interplay with intervalley phonon emission- | 5. 発行年<br>2017年       |
| 3. 雑誌名<br>Springer Advances in intelligent system and computing   | 6. 最初と最後の頁<br>137-141 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-             |

[学会発表] 計35件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 16件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>G.Prabhudesai, M.Manoharan, M.Hori, Y.Ono, H.Mizuta, M.Tabe, D.Moraru                                     |
| 2. 発表標題<br>Effect of dimensionality on the formation of dopant-induced quantum-dots in heavily doped Si Esaki diodes |
| 3. 学会等名<br>2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会   |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>堀匡寛, 土屋敏章, 小野行徳            |
| 2. 発表標題<br>シリコンMOS界面におけるチャージポンピングEDMR |
| 3. 学会等名<br>2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会    |
| 4. 発表年<br>2019年                       |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>土屋敏章, 堀匡寛, 小野行徳         |
| 2. 発表標題<br>2トラップ間のチャージポンピング相互作用    |
| 3. 学会等名<br>2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年<br>2019年                    |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yukinori Ono  |
| 2. 発表標題<br>Electron-electron scattering in nano-scaled silicon                                     |
| 3. 学会等名<br>5th International Conference on Nanoscience and Nanotechnology(ICONN2019) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>M. Hori, Y. Ono  |
| 2. 発表標題<br>Charge pumping EDMR on silicon MOSFETs   |
| 3. 学会等名<br>5th International Conference on Nanoscience and Nanotechnology (ICONN) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>堀匡寛, 小野行徳                                     |
| 2. 発表標題<br>チャージポンピングEDMR法を用いたSiO <sub>2</sub> /Si界面の欠陥検出 |
| 3. 学会等名<br>2018年日本表面真空学会中部支部研究会 (招待講演)                   |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>H. Firdaus, M. Hori, Y. Ono   |
| 2. 発表標題<br>Remote Detection of Holes Generated by Impact Ionization                                  |
| 3. 学会等名<br>17th International Conference on Global Research and Education Inter-Academia 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>T. Tsuchiya, M. Hori, Y. Ono   |
| 2 . 発表標題<br>Detection and Characterization of Single Near-Interface Oxide Traps with the Charge Pumping Method |
| 3 . 学会等名<br>International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA) (国際学会)  |
| 4 . 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>Y. Ono, H. Firdaus, M. Hori                                    |
| 2 . 発表標題<br>Observation of Impact Ionization in Silicon at Low Temperature |
| 3 . 学会等名<br>IV Bilateral Italy-Japan Seminar (招待講演) (国際学会)                 |
| 4 . 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>M. Hori, Y. Ono   |
| 2 . 発表標題<br>Charge pumping EDMR towards ultimate charge/spin control at room temperature in silicon |
| 3 . 学会等名<br>IV Bilateral Italy-Japan Seminar (招待講演) (国際学会)  |
| 4 . 発表年<br>2017年  |

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>H. Firdaus, M. Hori, Y. Takahashi, A. Fujiwara, Y. Ono                 |
| 2 . 発表標題<br>Sensitive Detection of Holes Generated by Impact Ionization in Silicon |
| 3 . 学会等名<br>2017 Silicon Nanoelectronics Workshop (国際学会)                           |
| 4 . 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>M. Hori, T. Watanabe, Y. Ono   |
| 2. 発表標題<br>Real-time Monitoring of Charge-pumping Process for SiO <sub>2</sub> /Si Interface Analysis |
| 3. 学会等名<br>The 15th International Conference on QiR (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Ono  |
| 2. 発表標題<br>Charge pump in silicon-Physics and application of charge transfer-    |
| 3. 学会等名<br>16th International Conference on Global Research and Education (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>堀匡寛, 土屋敏章, 小野行徳                    |
| 2. 発表標題<br>チャージポンピング E DMR法を用いたシリコン酸化膜界面欠陥の検出 |
| 3. 学会等名<br>第78回応用物理学会秋季学術講演会                  |
| 4. 発表年<br>2017年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>渡邊時暢, 堀匡寛, 小野行徳                         |
| 2. 発表標題<br>Silicon-on-insulatorデバイスにおける低温チャージポンピング |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会 シリコン材料・デバイス研究会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>渡邊時暢, 多胡友, 杉浦史悦, 堀匡寛, 小野行徳, 塚本裕也, 大見俊一郎 |
| 2. 発表標題<br>PtHfSi/p-Si(100)ショットキー接合の低温特性           |
| 3. 学会等名<br>平成29年度生体医歯工学共同研究拠点成果報告会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                                    |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>三宅丈雄, 堀匡寛, 小野行徳         |
| 2. 発表標題<br>身近な糖を燃料とするバイオ発電デバイスの開発  |
| 3. 学会等名<br>平成29年度生体医歯工学共同研究拠点成果報告会 |
| 4. 発表年<br>2018年                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>堀匡寛, 土屋敏章, 小野行徳                  |
| 2. 発表標題<br>チャージポンピングEDMR法を用いたシリコン酸化膜界面欠陥の検出 |
| 3. 学会等名<br>第65回応用物理学会春季学術講演会(招待講演)          |
| 4. 発表年<br>2018年                             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>土屋敏章, 堀匡寛, 小野行徳                                 |
| 2. 発表標題<br>チャージポンピング法によるSi/SiO <sub>2</sub> 界面近傍酸化膜トラップの評価 |
| 3. 学会等名<br>第65回応用物理学会春季学術講演会                               |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>安藤克哉, 堀匡寛, 土屋敏章, 小野行徳          |
| 2. 発表標題<br>チャージポンピングEDMR法における信号強度の温度異存性評価 |
| 3. 学会等名<br>第65回応用物理学会春季学術講演会              |
| 4. 発表年<br>2018年                           |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>M. Hori, Y. Ono   |
| 2. 発表標題<br>Novel application of the charge pumping process for charge and spin control |
| 3. 学会等名<br>EMN Meeting on Quantum 2016 (招待講演) (国際学会)                                   |
| 4. 発表年<br>2016年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Watanabe, M. Hori, Y. Ono   |
| 2. 発表標題<br>Time domain charge pumping on silicon-on-insulator MOS transistors   |
| 3. 学会等名<br>2016 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices(AWAD2016) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2016年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>M. Hori, R. Narimatsu, Y. Ono   |
| 2. 発表標題<br>Charge pumping EDMR towards charge/spin manipulation in silicon at room temperature |
| 3. 学会等名<br>2016 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop(SNW2016) (国際学会)                          |
| 4. 発表年<br>2016年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>土屋敏章, 小野行徳   |
| 2. 発表標題<br>Charge Pumping Current from Single Si/SiO <sub>2</sub> Interface Traps: Direct Observation of Pb Centers and Fundamental Trap-Counting by the Charge Pumping Method by the charge pumping method |
| 3. 学会等名<br>第77回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)   |
| 4. 発表年<br>2016年   |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>堀 匡寛, 成松諒一, 土屋敏章, 小野行徳 |
| 2. 発表標題<br>高感度チャージポンピングEDMR法の開発   |
| 3. 学会等名<br>第77回応用物理学会秋季学術講演会      |
| 4. 発表年<br>2016年                   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Ono, M. Hori, G. P. Lansbergen, A. Fujiwara  |
| 2. 発表標題<br>Manipulation of Single Charges Using Dopant Atoms in Silicon-Interplay with Intervalley Phonon Emission |
| 3. 学会等名<br>Inter Academia2016 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2016年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>M. Hori, Y. Ono  |
| 2. 発表標題<br>EDMR on recombination process in Silicon MOSFETs at room Temperature |
| 3. 学会等名<br>Inter Academia2016 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2016年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>小野行徳  |
| 2. 発表標題<br>Single-dopant transistor and pump-interplay with single phonon- |
| 3. 学会等名<br>フォノンエンジニアリング講演会 (招待講演)  |
| 4. 発表年<br>2016年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Ono, M. Hori, A. Fujiwara    |
| 2. 発表標題<br>Silicon Single Boron Transistor |
| 3. 学会等名<br>ICNERE EECCiS2016 (国際学会)        |
| 4. 発表年<br>2016年                            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>M. Hori, Y. Ono  |
| 2. 発表標題<br>Charge pumping EDMR for MOS interface analysis               |
| 3. 学会等名<br>The 18th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2016年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>渡邊時暢, 堀匡寛, 小野行徳                |
| 2. 発表標題<br>SOI MOS p-i-nダイオードの低温チャージポンピング |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会研究会                    |
| 4. 発表年<br>2017年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Prabhudesai Gaurang, Anh Le The, Shibuya Mitsuki, Manoharan Muruganathan, Hori Masahiro, Ono Yukinori, Mizuta Hiroshi, Tabe Michiharu, Moraru Daniel |
| 2. 発表標題<br>Study of Electron Localization Effects in Donor-Acceptor Pairs in Low-Dimensional Si Tunnel Diodes   |
| 3. 学会等名<br>第64回応用物理学会春季学術講演会  |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hasan KM Tarik, Samanta Arup, Affiff Adnan, Anh Le The, Manoharan Muruganathan, Hori Masahiro, Ono Yukinori, Mizuta Hiroshi, Tabe Michiharu, Moraru Daniel |
| 2. 発表標題<br>Study of Stability of A-few-donor Quantum Dots with Different Configurations for Room-Temperature Single-Electron Tunneling Operation                      |
| 3. 学会等名<br>第64回応用物理学会春季学術講演会  |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>渡邊時暢, 堀匡寛, 土屋敏章, 藤原聡, 小野行徳                       |
| 2. 発表標題<br>Silicon-on-insulator MOS デバイスにおける実時間チャージポンピングの応用 |
| 3. 学会等名<br>第64回応用物理学会春季学術講演会                                |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>小野行徳, 堀匡寛, 土屋敏章                    |
| 2. 発表標題<br>シリコンにおけるチャージポンプー電荷とスピンの室温極限操作に向けてー |
| 3. 学会等名<br>第29回シリサイド系半導体研究会 (招待講演)            |
| 4. 発表年<br>2017年                               |



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

静岡大学電子工学研究所 小野・堀研究室ホームページ  
<https://wpp.shizuoka.ac.jp/nano/>

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                              | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                   | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 堀 匡寛<br><br>(Hori Masahiro)<br><br>(50643269)          | 静岡大学・電子工学研究所・講師<br><br><br><br>(13801)  |    |
| 研究分担者 | Moraru Daniel<br><br>(Moraru Daniel)<br><br>(60549715) | 静岡大学・電子工学研究所・准教授<br><br><br><br>(13801) |    |